

Evaluasi Eksperimental Terintegrasi Kinerja Turbin Angin Savonius Helical-Bach Modifikasi pada Lingkungan Rooftop

Armand Hattab¹, Musa B. Palungan², Atus Buku³

^{1,2,3*)} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus

Jl. Perintis Kemerdekaan km 13 Daya, Makassar, Sulawesi Selatan 90243

Hattabarmand71@gmail.com, penulis2@uin-suska.ac.id, atus@ukipaulus.ac.id

ABSTRAK

Pemanfaatan turbin angin skala kecil pada lingkungan rooftop memerlukan desain rotor yang mampu melakukan self-starting pada kecepatan angin rendah sekaligus mempertahankan kestabilan mekanis sistem. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja aerodinamis, mekanis, elektrik, dan struktural turbin angin poros vertikal Savonius Helical-Bach modifikasi dengan rasio kelengkungan seimbang ($p=q$) pada kondisi rooftop aktual. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental melalui pengukuran kecepatan angin, putaran rotor/generator, tegangan, arus, serta evaluasi struktur dan sambungan mekanis. Hasil menunjukkan cut-in wind speed sebesar 1,1–1,5 m/s tanpa beban dan 2,1–2,5 m/s dengan beban. Pada rentang kecepatan angin 2,1–4,9 m/s, keluaran listrik meningkat seiring peningkatan kecepatan angin, dengan performa sesaat tertinggi pada 4,9 m/s sebesar 310 rpm, 4,6 V, 0,59 A, dan 2,71 W. Lendutan rangka sebesar 0,54 mm dan tegangan lentur sambungan knockdown 138,48 MPa menunjukkan struktur utama masih berada dalam batas rancangan, meskipun tubing 3/8 inci teridentifikasi sebagai komponen kritis. Hasil ini menunjukkan potensi konfigurasi Helical-Bach untuk aplikasi VAWT rooftop berkecepatan angin rendah dengan evaluasi sistem yang terintegrasi.

Kata kunci: Savonius Helical-Bach; turbin angin poros vertikal; self-starting; energi angin rooftop; integritas struktur

ABSTRACT

The utilization of small-scale wind turbines in rooftop environments requires a rotor design capable of self-starting at low wind speeds while maintaining the mechanical stability of the system. This study evaluates the aerodynamic, mechanical, electrical, and structural performance of a modified Savonius Helical-Bach vertical-axis wind turbine with a balanced curvature ratio ($p=q$) under actual rooftop conditions. A quantitative experimental approach was employed by measuring wind speed, rotor/generator rotational speed, voltage, and current, together with evaluations of the structure and mechanical joints. The results show a cut-in wind speed of 1.1–1.5 m/s under no-load conditions and 2.1–2.5 m/s under load. Within the tested wind-speed range of 2.1–4.9 m/s, electrical output increased with wind speed, with the highest instantaneous performance at 4.9 m/s reaching 310 rpm, 4.6 V, 0.59 A, and 2.71 W. A frame deflection of 0.54 mm and a knockdown-joint bending stress of 138.48 MPa indicate that the main structure remains within the design limits, although the 3/8-inch tubing was identified as a critical component. These findings demonstrate the potential of the Helical-Bach configuration for low-wind-speed rooftop VAWT applications through an integrated system evaluation.

Keywords: Savonius Helical-Bach; vertical-axis wind turbine; self-starting; rooftop wind energy; structural integrity

Pendahuluan

Transisi menuju sistem energi rendah karbon mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan yang tidak hanya berkapasitas besar dan terpusat, tetapi juga dapat diaplikasikan sebagai pembangkit terdistribusi pada skala bangunan dan komunitas. Dalam konteks tersebut, energi angin skala kecil menawarkan peluang untuk memanfaatkan sumber energi lokal, terutama ketika sistem pembangkit dapat diintegrasikan dengan lingkungan terbangun. Meskipun demikian, pemanfaatan energi angin di kawasan urban menghadapi tantangan yang berbeda dibandingkan instalasi pada medan terbuka. Keberadaan bangunan, variasi kekasaran permukaan, perubahan arah angin, serta interaksi antara aliran atmosfer dan geometri perkotaan menyebabkan kecepatan angin rata-rata cenderung lebih rendah dan intensitas turbulensi lebih tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan estimasi produksi energi berdasarkan karakteristik angin ideal sering kali berbeda dengan performa aktual di lapangan. Oleh karena itu, pengembangan turbin angin skala kecil untuk lingkungan urban membutuhkan pendekatan yang mempertimbangkan secara simultan karakteristik aerodinamis turbin dan kondisi aliran aktual pada lokasi instalasi [1]–[3].

Turbin angin poros vertikal atau Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan salah satu teknologi yang potensial untuk aplikasi tersebut karena sumbu rotasinya tidak memerlukan mekanisme yaw untuk mengikuti perubahan arah angin. Di antara berbagai konfigurasi VAWT, rotor Savonius memiliki keunggulan berupa konstruksi yang relatif sederhana, kemampuan menerima angin dari berbagai arah, kecepatan operasi yang relatif rendah, karakteristik torsi awal

yang baik, serta kemampuan self-starting yang mendukung operasi pada kondisi angin rendah [4]. Karakteristik tersebut menjadikan Savonius menarik untuk pembangkit energi skala kecil dan aplikasi di lingkungan terbangun. Namun, keunggulan dalam starting torque tersebut disertai keterbatasan berupa koefisien daya yang secara umum lebih rendah dibandingkan turbin berbasis gaya angkat, fluktuasi torsi selama rotasi, serta munculnya torsi negatif ketika returning blade bergerak melawan arah aliran. Akwa et al. [4] menunjukkan bahwa performa rotor Savonius sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, parameter aliran, dan konfigurasi geometrinya, sehingga modifikasi geometri menjadi salah satu strategi utama dalam meningkatkan kemampuan ekstraksi energi.

Berbagai penelitian eksperimental telah menunjukkan bahwa karakteristik Savonius dapat ditingkatkan melalui optimasi jumlah sudu, jumlah tingkat, aspect ratio, overlap ratio, sudut lengkung bilah, bentuk profil, serta konfigurasi sudu. Saha et al. [5] menunjukkan bahwa jumlah tingkat dan geometri bilah memberikan pengaruh nyata terhadap performa Savonius, sedangkan Kamoji et al. [6] menemukan bahwa overlap ratio, blade arc angle, aspect ratio, dan Reynolds number menentukan koefisien torsi dan koefisien daya rotor modifikasi. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kinerja tidak dapat diperoleh hanya melalui perubahan satu parameter geometris secara terisolasi, tetapi memerlukan konfigurasi yang mampu meningkatkan gaya pada advancing blade sekaligus mengurangi kerugian aerodinamis pada returning blade. Selain itu, geometri rotor juga menentukan karakteristik torsi statik, yang menjadi parameter fundamental bagi kemampuan rotor untuk memulai rotasi dari keadaan diam. Dengan demikian, optimasi Savonius harus mempertimbangkan keseimbangan antara kemampuan self-starting, kestabilan torsi, dan kemampuan ekstraksi daya pada kondisi operasi turbin [5], [6].

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengurangi fluktuasi torsi Savonius adalah penerapan geometri helikal. Perubahan sudu dari konfigurasi lurus menjadi helikal menyebabkan bagian-bagian rotor berinteraksi dengan aliran pada posisi azimuth yang berbeda secara simultan sehingga distribusi torsi sepanjang satu putaran dapat menjadi lebih merata. Lee et al. [7] menunjukkan bahwa perubahan twist angle pada rotor Savonius secara substansial memengaruhi koefisien daya, koefisien torsi, dan pola aliran di sekitar rotor. Lebih lanjut, Damak et al. [8] mengembangkan konfigurasi Helical–Bach dengan mengganti profil dasar semisirkular rotor helikal menggunakan profil Bach. Hasil pengujian wind tunnel menunjukkan bahwa rotor Helical–Bach memiliki karakteristik koefisien daya dan torsi statik yang kompetitif, dengan koefisien daya sekitar 0,20 pada tip speed ratio sekitar 0,75. Studi numerik Niyat Zadeh et al. [9] selanjutnya menunjukkan bahwa modifikasi bagian Bach pada rotor helikal dapat mengurangi separasi aliran dan meningkatkan performa dibandingkan konfigurasi helikal dasar. Temuan-temuan tersebut memberikan dasar bahwa kombinasi profil Bach dan konfigurasi helikal merupakan jalur pengembangan yang relevan untuk meningkatkan karakteristik aerodinamis Savonius [7]–[9].

Akan tetapi, performa aerodinamis yang diperoleh pada wind tunnel atau simulasi numerik belum tentu dapat direplikasi secara langsung pada instalasi rooftop. Lingkungan terbangun menghasilkan medan aliran yang kompleks karena separasi di tepi bangunan, recirculation, wind shear, perubahan arah, serta turbulensi yang sangat bergantung pada geometri bangunan dan posisi turbin. Tabrizi et al. [3] menunjukkan bahwa karakterisasi turbulensi rooftop bahkan sensitif terhadap sampling rate dan periode perata-rataan data, sedangkan Longo et al. [10] memperlihatkan bahwa keberadaan bangunan di sekitar turbin Savonius dapat menyebabkan produksi energi berbeda secara signifikan dibandingkan kondisi aliran ideal. Selain itu, respons aktual turbin tidak hanya dipengaruhi oleh aerodinamika rotor. Inersia rotor, drivetrain, generator, serta karakteristik struktur juga menentukan seberapa cepat sistem merespons perubahan angin. Danao et al. [11] menunjukkan bahwa kondisi angin tidak tunak menghasilkan fluktuasi kecepatan rotor dan koefisien daya VAWT, sementara Battisti et al. [12] menekankan bahwa efek inersia perlu diperhitungkan ketika mengevaluasi efektivitas turbin angin kecil pada lingkungan urban. Dengan demikian, validasi performa pada kondisi lapangan merupakan tahap penting setelah optimasi geometris rotor.

Dalam konteks state-of-the-art, pengembangan Savonius saat ini telah bergeser dari optimasi geometri konvensional menuju integrasi konfigurasi helikal, peningkatan kemampuan self-starting, serta validasi performa pada kondisi angin rendah dan lingkungan urban. Lee et al. [7] menunjukkan pentingnya twist angle dalam membentuk karakteristik torsi rotor, sedangkan Damak et al. [8] dan Niyat Zadeh et al. [9] menunjukkan potensi kombinasi Helical–Bach dalam meningkatkan performa dibandingkan rotor helikal dasar. Studi yang lebih baru oleh Farozan et al. [13] memperlihatkan bahwa twist angle 90° menghasilkan rata-rata self-starting wind speed sekitar 2,5 m/s dan menegaskan bahwa kemampuan self-starting dapat lebih menentukan produksi energi pada lokasi berkecepatan angin rendah daripada sekadar pencapaian koefisien daya maksimum. Pada sisi aplikasi, Pagnini et al. [14] menunjukkan melalui pengujian skala penuh bahwa performa energi dan respons struktur VAWT merupakan dua aspek yang saling terkait, sementara Toor et al. [15] menegaskan pentingnya mengkombinasikan optimasi desain, pengujian laboratorium, dan validasi rooftop untuk memperoleh gambaran performa VAWT yang representatif.

Meskipun berbagai studi tersebut telah memberikan kemajuan penting, masih terdapat kesenjangan penelitian pada evaluasi eksperimental Helical–Bach Savonius sebagai suatu sistem terintegrasi ketika dioperasikan pada kondisi angin rooftop aktual. Sebagian besar penelitian optimasi Helical–Bach dan Savonius termodifikasi masih berorientasi pada (C_p), (C_T), TSR, distribusi tekanan, atau pola aliran pada kondisi wind tunnel dan CFD yang relatif terkendali [7]–[9]. Di sisi lain, kajian lingkungan urban menunjukkan bahwa turbulensi, interaksi bangunan, inersia rotor, dan karakteristik struktur dapat menyebabkan respons aktual berbeda dari prediksi kondisi ideal [2], [10], [14]. Walaupun studi rooftop VAWT terbaru mulai mengintegrasikan pengujian lapangan dengan optimasi desain [15], kajian yang secara khusus mengevaluasi

Savonius Helical–Bach modifikasi dengan rasio kelengkungan seimbang ($p=q$) bersama respons rotor, generator, dan struktur penyangga pada kondisi rooftop masih terbatas. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini ditempatkan pada evaluasi eksperimental terintegrasi rotor–transmisi–generator–struktur, bukan semata-mata pada klaim optimasi satu parameter geometris tertentu.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik aerodinamis, mekanis, elektrik, dan integritas struktur VAWT Savonius Helical–Bach modifikasi dengan rasio kelengkungan ($p=q$) pada kondisi operasi rooftop aktual. Evaluasi diarahkan pada kemampuan self-starting melalui penentuan cut-in wind speed pada kondisi tanpa beban dan berbeban, respons putaran rotor–generator terhadap perubahan kecepatan angin, keluaran tegangan, arus dan daya listrik, serta respons mekanis struktur penyangga terhadap pembebanan statis dan angin. Pendekatan tersebut penting karena kelayakan VAWT untuk aplikasi urban tidak cukup ditentukan oleh performa aerodinamis rotor, tetapi juga oleh kemampuan drivetrain dan generator dalam mengkonversi energi serta kemampuan struktur dalam mempertahankan keselarasan dan kestabilan sistem ketika menerima aliran tidak tunak. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan dasar eksperimental bagi pengembangan turbin angin Savonius skala kecil yang lebih adaptif terhadap karakteristik angin rooftop serta memberikan kerangka evaluasi yang menghubungkan aspek aerodinamis, konversi energi, dan integritas mekanis dalam satu sistem [1], [14], [15].

Metode Penelitian

Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk mengevaluasi karakteristik unjuk kerja mekanis dan konversi energi pada turbin angin poros vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Helical Savonius Bach Modifikasi dengan konfigurasi rasio kelengkungan bilah seimbang, yaitu ($p=q$). Pendekatan eksperimental dipilih karena penelitian diarahkan pada pengamatan langsung respons sistem turbin terhadap kondisi angin aktual di lingkungan terbuka, khususnya pada instalasi rooftop. Parameter utama yang diamati meliputi kecepatan angin, kecepatan putar rotor dan generator, tegangan keluaran, arus listrik, serta tingkat getaran sistem.

Desain penelitian tidak hanya mengevaluasi kemampuan rotor dalam menangkap energi kinetik angin, tetapi juga mempertimbangkan kestabilan struktur pendukung sebagai bagian integral dari sistem konversi energi. Struktur penopang dirancang untuk meminimalkan kehilangan energi mekanis yang dapat terjadi akibat getaran, ketidakselarasan sumbu putar, deformasi rangka, dan kelonggaran sambungan mekanis. Upaya tersebut dilakukan melalui penggunaan plat penguat dengan ketebalan 7 mm, bantalan atau elemen isolasi getaran, sistem klem ganda pada bagian selongsong *knockdown*, serta sistem pengankuran menggunakan baut M12. Pendekatan ini dimaksudkan agar energi rotasi rotor dapat diteruskan menuju generator dengan kehilangan mekanis seminimal mungkin sehingga karakteristik kinerja rotor dapat dievaluasi secara lebih representatif.

Dalam penelitian ini, struktur rangka diperlakukan sebagai sistem pendukung terkendali, sedangkan respons rotor–generator terhadap kondisi angin menjadi objek utama pengukuran. Kecepatan angin maksimum atau kecepatan angin acuan pada lokasi pengujian ditetapkan sebesar 18 m/s berdasarkan kondisi yang digunakan dalam rancangan penelitian. Penggunaan kondisi tersebut juga menjadi dasar dalam evaluasi kekuatan struktur akibat pembebanan lateral angin.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Tahapan pemodelan, perencanaan struktur, persiapan material, fabrikasi komponen, serta perakitan sistem turbin dilakukan di Workshop Manufaktur dan Laboratorium Mekanik Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar. Setelah proses fabrikasi dan pengujian awal selesai, prototipe dipasang pada rooftop Gedung Lilin Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar sebagai lokasi pengujian lapangan.

Pengambilan data eksperimental dilakukan pada periode Mei sampai awal Agustus 2026. Pemilihan rooftop sebagai lokasi pengujian dimaksudkan agar rotor memperoleh paparan angin lingkungan secara langsung sehingga respons mekanis dan keluaran sistem dapat diamati pada kondisi operasi yang mendekati kondisi aplikasi aktual. Selama pengujian, posisi turbin dan perangkat pengukuran dipertahankan untuk menjaga konsistensi konfigurasi sistem selama proses akuisisi data.

Konfigurasi Sistem Turbin Angin

Sistem yang diuji terdiri atas rotor VAWT tipe Helical Savonius Bach Modifikasi, poros utama, rangka penyangga, bantalan, sistem kopling atau transmisi, generator, dan perangkat akuisisi data. Rotor menggunakan bilah berbahan plastik polimer dengan ketebalan 1,5 mm dan dimensi karakteristik rotor sebesar 135×90 cm. Poros utama menggunakan pipa baja Schedule 40 berukuran 3/4 inci, sedangkan lengan horizontal pengikat bilah menggunakan tubing baja ST 37 berukuran 3/8 inci.

Rangka utama menggunakan profil hollow galvanis berukuran 40×60 mm dengan ketebalan dinding 1,2 mm. Pada daerah yang menerima konsentrasi beban, terutama pada dudukan bantalan dan plat dasar, digunakan

plat baja lunak (*mild steel*) dengan ketebalan 7 mm sebagai elemen penguat. Sambungan mekanis menggunakan kombinasi baut baja M12, M8, dan M4 sesuai fungsi masing-masing. Baut M12 digunakan terutama sebagai sistem angkur terhadap struktur beton, sedangkan baut dengan diameter lebih kecil digunakan pada poros, rotor, bilah, dan komponen pengaku.

Tabel 1. Spesifikasi material utama sistem turbin dan struktur penyangga

Komponen	Material/Spesifikasi	Dimensi/Ukuran	Fungsi
Rangka utama	Hollow galvanis	40 × 60 mm; tebal 1,2 mm	Tiang utama dan balok horizontal
Poros utama	Pipa baja Schedule 40	3/4 inci	Meneruskan putaran rotor
Lengan rotor	Tubing baja ST 37	3/8 inci	Pengikat bilah terhadap poros
Plat penguat	Mild steel	Tebal 7 mm	Penguatudukan bantalan dan base plate
Bilah rotor	Plastik polimer	Tebal 1,5 mm	Elemen penangkap energi angin
Baut angkur	Baja Grade 4.8	M12; panjang 16 cm	Penguncian rangka terhadap beton
Baut poros	Baja	M8	Penguncian komponen poros
Baut rotor dan pengaku	Baja	M4 × 30–100 mm	Sambungan bilah dan pengaku rotor
Selongsong	Tubing aluminium	6 mm	Selongsong antara poros baut dan rangka rotor

Peralatan Fabrikasi dan Pengukuran

Proses fabrikasi dilakukan menggunakan mesin las listrik tipe MMA/MIG untuk penyambungan profil rangka, gerinda tangan dan mesin potong untuk pemotongan material, serta mesin bor duduk untuk pembuatan lubang sambungan baut. Ketelitian geometris rangka dan komponen diperiksa menggunakan jangka sorong, meteran, *dial indicator*, dan *waterpass*. Pemeriksaan geometris terutama dilakukan untuk menjamin kesesuaian dimensi, kelurusan poros, dan vertikalitas struktur sehingga ketidaksejajaran mekanis yang dapat meningkatkan getaran dan kehilangan transmisi dapat diminimalkan.

Akuisisi parameter operasi dilakukan menggunakan anemometer digital, tachometer digital, voltmeter-ampere-meter DC, dan alat ukur getaran. Instrumen tersebut digunakan secara terintegrasi untuk memperoleh hubungan antara kondisi aliran angin, respons rotasi rotor-generator, keluaran listrik, dan getaran mekanis struktur.

Tabel 2. Instrumen pengukuran yang digunakan pada pengujian

Instrumen	Spesifikasi/ketelitian	Parameter yang diukur
Anemometer digital	Resolusi $\pm 0,1$ m/s	Kecepatan angin
Digital LED Tachometer RPM Speed Meter dengan Proximity Switch Sensor NPN	Error 0,5–1,5 rpm	Kecepatan putar rotor/generator
Dualmeter Combo Voltmeter-Ampere-meter	10 A; 100 V DC; rentang kerja 4–30 V; $\pm 0,1\%$ V dan $\pm 1\%$ A	Tegangan dan arus listrik
SKF Machine Condition Advisor CMAS 100-SL/Vibration Pen	Sesuai spesifikasi instrumen	Getaran mekanis sistem
Jangka sorong, meteran, dial indicator, dan <i>waterpass</i>	Sesuai spesifikasi masing-masing alat	Dimensi, kelurusan, dan keselarasan struktur

Prosedur Fabrikasi dan Perakitan

Penelitian diawali dengan identifikasi kebutuhan desain dan studi literatur yang berkaitan dengan karakteristik VAWT tipe Savonius, konfigurasi geometri Bach, sistem penyangga, serta mekanisme transmisi daya. Berdasarkan hasil tahap tersebut dilakukan pemilihan material untuk rotor, poros, rangka, sambungan mekanis, dan komponen pendukung.

Komponen rangka dan rotor selanjutnya difabrikasi sesuai dimensi rancangan. Tahap fabrikasi mencakup pemotongan profil, pembuatan lubang sambungan, proses pengelasan, pemasangan plat penguat, penyusunan rotor, pemasangan poros dan bantalan, serta integrasi generator dengan mekanisme kopling atau transmisi yang digunakan pada sistem. Ketelitian posisi poros dan bantalan diperiksa sebelum pengujian untuk mengurangi kemungkinan terjadinya *misalignment* yang dapat meningkatkan gesekan dan vibrasi.

Setelah seluruh komponen terpasang, sistem diuji terlebih dahulu pada kondisi tanpa beban (*no-load test*) untuk memastikan rotor dapat berputar secara bebas dan tidak mengalami hambatan mekanis yang berlebihan. Selanjutnya dilakukan pengujian dengan beban untuk memastikan bahwa putaran rotor dapat diteruskan menuju generator secara stabil. Sistem yang telah memenuhi kondisi operasional kemudian dipasang pada rooftop Gedung Lilin UKI Paulus Makassar untuk menjalani pengujian lapangan.

Prosedur Pengujian Eksperimental

Pengujian dilakukan setelah struktur turbin terpasang dan seluruh sambungan mekanis dipastikan berada dalam kondisi aman. Sebelum proses akuisisi data, dilakukan pemeriksaan terhadap kekencangan baut, posisi bantalan, keselarasan poros, kestabilan rangka, dan kondisi instrumen pengukuran. Pemeriksaan ini diperlukan untuk mengurangi pengaruh gangguan mekanis yang tidak berasal dari respons utama rotor terhadap angin.

Selama turbin beroperasi, kecepatan angin diukur menggunakan anemometer digital. Secara simultan atau pada interval pengamatan yang sama, kecepatan putar rotor atau generator direkam menggunakan tachometer, sedangkan tegangan dan arus keluaran generator diukur menggunakan voltmeter-ampere-meter DC. Tingkat getaran struktur dan sistem rotor diukur menggunakan vibration pen untuk mengevaluasi kestabilan mekanis selama pengoperasian.

Data hasil pengukuran kemudian dicatat dan dikelompokkan berdasarkan kondisi kecepatan angin. Pendekatan tersebut memungkinkan hubungan antara energi angin yang tersedia, respons putaran rotor, keluaran generator, dan perilaku vibrasi sistem dianalisis secara bersamaan. Dengan demikian, evaluasi kinerja tidak hanya didasarkan pada besarnya keluaran listrik, tetapi juga mempertimbangkan kestabilan mekanis struktur sebagai faktor yang dapat memengaruhi efektivitas transmisi daya.

Tabel 3. Parameter utama dalam pengujian eksperimental

Kelompok parameter	Parameter	Instrumen/Sumber data	Tujuan pengukuran
Kondisi aliran	Kecepatan angin	Anemometer	Menentukan kondisi input energi angin
Respons rotor	Kecepatan putar	Tachometer	Mengevaluasi respons rotasional rotor/generator
Keluaran listrik	Tegangan	Voltmeter	Mengevaluasi keluaran generator
Keluaran listrik	Arus	Amperemeter	Mengevaluasi keluaran generator
Respons mekanis	Getaran	Vibration Pen	Mengevaluasi kestabilan rotor dan rangka
Geometri	Dimensi rotor	Pengukuran langsung	Menentukan karakteristik geometris dan luas sapuan
Pembebanan	Massa sistem mekanis bagian atas	Penimbangan langsung	Menentukan beban statis aksial
Struktur	Defleksi/deformasi	Pengukuran/perhitungan	Mengevaluasi kekakuan struktur

Penentuan Parameter Geometri dan Pembebanan

Parameter geometris diperoleh melalui pengukuran langsung terhadap komponen prototipe. Dimensi karakteristik rotor yang digunakan dalam penelitian adalah 135×90 cm. Data geometri selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menentukan karakteristik sapuan rotor dan parameter yang berkaitan dengan interaksi antara rotor dan aliran angin.

Massa total komponen mekanis bagian atas yang terdiri atas rotor, bantalan, dan sistem transmisi ditetapkan sebesar 20 kg berdasarkan hasil penimbangan langsung. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan pembebanan statis aksial pada sistem penyangga. Selain pembebanan vertikal akibat massa komponen, struktur juga dievaluasi terhadap pembebanan lateral akibat angin dengan kondisi kecepatan angin acuan hingga 18 m/s.

Evaluasi struktur dilakukan pada bagian yang diperkirakan menerima pembebanan kritis. Pengamatan meliputi deformasi atau defleksi pada bentang horizontal sepanjang 1,5 m, tegangan lentur pada tiang struktur tingkat kedua sepanjang 150 cm akibat gaya angin lateral, serta tegangan geser pada kelompok baut pengunci rotor akibat kombinasi torsi dan gaya yang bekerja selama rotor beroperasi.

Analisis Kinerja Mekanis dan Elektrik

Data eksperimen dianalisis untuk mengidentifikasi hubungan antara kecepatan angin, kecepatan putar rotor atau generator, tegangan, arus, dan vibrasi. Analisis dilakukan dengan membandingkan perubahan masing-masing parameter pada kondisi operasi yang diperoleh selama pengujian rooftop. Kecepatan putar digunakan sebagai indikator kemampuan rotor mengubah energi kinetik angin menjadi energi rotasi, sedangkan tegangan dan arus digunakan untuk mengevaluasi respons keluaran generator.

Analisis vibrasi digunakan untuk mengevaluasi kestabilan sistem rotor dan efektivitas struktur penopang selama operasi. Peningkatan vibrasi dapat mengindikasikan adanya ketidakseimbangan rotor, kelonggaran sambungan, ketidakselarasan poros, atau fleksibilitas struktur yang berlebihan. Oleh karena itu, data vibrasi dianalisis bersama dengan kecepatan putar dan keluaran generator sehingga penurunan performa yang berkaitan dengan gangguan mekanis dapat diidentifikasi secara lebih komprehensif.

Analisis Kekuatan dan Kelayakan Struktur

Analisis kekuatan struktur dilakukan dengan mengevaluasi respons rangka terhadap kombinasi beban statis dan beban lateral akibat angin. Parameter yang dianalisis mencakup defleksi struktur, tegangan lentur pada elemen rangka, serta tegangan geser pada sambungan baut. Nilai tegangan kerja aktual selanjutnya dibandingkan dengan kapasitas material berdasarkan kuat leleh (*yield strength*) yang digunakan dalam rancangan.

Evaluasi kelayakan struktur mengacu pada prinsip desain struktur baja sebagaimana digunakan dalam SNI 1729:2020 [16] dan ANSI/AISC 360-16 [17]. Faktor keamanan (*Safety Factor*, SF) digunakan sebagai salah satu indikator untuk menentukan kemampuan struktur menahan beban kerja. Struktur dinyatakan memenuhi kriteria dasar kelayakan apabila kapasitas struktur lebih besar daripada beban atau tegangan kerja yang terjadi, yang ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan lebih besar dari satu ($SF > 1,0$).

Selain evaluasi tegangan dan faktor keamanan, analisis difokuskan pada kontribusi plat penguat setebal 7 mm dan mekanisme sambungan *knockdown* sepanjang 50 cm terhadap kestabilan struktur. Efektivitas sistem tersebut dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam mempertahankan keselarasan sumbu rotor dan mengurangi goyangan dinamis atau *backlash* selama turbin beroperasi.

Pengolahan dan Interpretasi Data

Data hasil pengujian diperiksa terlebih dahulu untuk memastikan kelengkapan dan konsistensi pencatatan. Data selanjutnya dikelompokkan berdasarkan parameter kecepatan angin, putaran rotor atau generator, tegangan, arus, dan vibrasi. Hubungan antarparameter dianalisis untuk menentukan kecenderungan perubahan performa sistem terhadap variasi kondisi operasi.

Interpretasi hasil dilakukan melalui pendekatan gabungan antara performa aerodinamis-mekanis, keluaran elektrik, dan kestabilan struktur. Sistem turbin dinilai memiliki performa yang baik apabila peningkatan energi angin dapat direspons oleh peningkatan putaran dan keluaran generator tanpa menghasilkan vibrasi berlebihan atau respons struktur yang melampaui batas kelayakan. Pendekatan tersebut memberikan dasar evaluasi yang lebih komprehensif karena keberhasilan sistem VAWT tidak hanya ditentukan oleh kemampuan rotor menghasilkan putaran, tetapi juga oleh kemampuan rangka, poros, bantalan, dan sambungan dalam mempertahankan kestabilan mekanis selama proses konversi energi.

Hasil Dan Pembahasan

Karakteristik Geometri dan Konfigurasi Prototipe

Prototipe yang dikembangkan merupakan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*, VAWT) tipe Savonius dua sudu dengan konfigurasi Helical-Bach modifikasi. Rotor memiliki tinggi 1,35 m dan diameter 0,90 m sehingga menghasilkan luas sapuan sebesar 1,215 m². Geometri rotor menggunakan *arc angle* 135°, *twist angle* 90°, jarak overlap 9 cm, jarak celah terdalam antarsudu 11 cm, serta konfigurasi kelengkungan *end plate* dengan parameter ($P=Q=21$) cm. Berdasarkan dimensi tersebut, rotor memiliki *aspect ratio* sebesar 1,50 dan *overlap ratio* sebesar 0,10. Sistem transmisi menggunakan rasio pulley 18:5 atau 3,6 dan dikopel dengan generator BLDC berkapasitas nominal 350 W, 12 V pada 500 rpm.

Tabel 4. Karakteristik geometris dan konfigurasi sistem turbin

Parameter	Nilai/Spesifikasi
Tipe turbin	VAWT Savonius Helical-Bach modifikasi
Jumlah sudu	2
Tinggi rotor, (H)	1,35 m
Diameter rotor, (D)	0,90 m
Luas sapuan, (A)	1,215 m ²
Aspect ratio	1,50
Jarak overlap	9 cm
Overlap ratio	0,10
Celah terdalam antarsudu	11 cm
Arc angle	135°
Twist angle	90°
Rasio (P/Q)	21/21 cm = 1,0
Rasio pulley	18:5 = 3,6
Generator	BLDC 350 W, 12 V, 500 rpm
Lokasi pengujian	Rooftop gedung, ±25 m dari permukaan tanah



Gambar 1. Prototipe VAWT Savonius Helical-Bach modifikasi yang digunakan pada pengujian rooftop

Struktur penyangga prototipe dibangun dalam konfigurasi dua tingkat dengan dimensi dasar $1,5 \times 1,5$ m dan tinggi total 2,0 m. Tingkat pertama setinggi 0,5 m digunakan sebagai bagian penempatan sistem generator, sedangkan tingkat kedua setinggi 1,5 m menopang rotor. Profil utama menggunakan hollow galvanis $40 \times 60 \times 1,2$ mm. Berdasarkan geometri penampang yang digunakan dalam perhitungan, momen inersia sumbu kuat struktur diperoleh sebesar 121.210,68 mm⁴.

Respons Struktur terhadap Pembebanan Statis dan Angin

Pembebanan statis yang berasal dari massa total komponen mekanis sebesar 20 kg atau sekitar 196,2 N menghasilkan lendutan teoritis sebesar 0,54 mm pada bentang horizontal 1,5 m. Nilai tersebut hanya sekitar 10,8% dari batas lendutan rancangan sebesar 5 mm ($(L/300)$). Hasil ini menunjukkan bahwa deformasi rangka akibat beban mati relatif kecil dibandingkan dengan batas deformasi yang digunakan dalam rancangan.

Pada kondisi pembebanan lateral, kecepatan angin ekstrem rancangan sebesar 18 m/s menghasilkan gaya dorong sekitar 283,44 N pada luas proyeksi rotor 1,215 m². Gaya lateral tersebut selanjutnya diteruskan ke struktur penyangga, sambungan *knockdown*, dan sistem penangkuran pada fondasi beton.

Pada sambungan *knockdown* tingkat kedua, tegangan lentur yang diperoleh dalam hasil perhitungan penelitian adalah sebesar 138,48 MPa. Dengan menggunakan kuat leleh material sebesar 240 MPa, faktor keamanan struktur terhadap pembebanan lentur diperoleh sekitar 1,7. Dengan demikian, berdasarkan parameter material yang digunakan dalam rancangan, tegangan kerja pada elemen tersebut masih berada di bawah nilai kuat leleh.

Sistem fondasi menggunakan delapan baut angkur M12 × 160 mm yang terdistribusi pada empat tiang utama. Pada gaya lateral sebesar 283,44 N, gaya geser rata-rata yang diterima setiap baut sebesar 35,43 N. Sementara itu, momen guling sebesar sekitar 496 N·m menghasilkan gaya tarik kelompok angkur sebesar 330,68 N atau sekitar 82,67 N untuk setiap baut aktif pada sisi yang mengalami tarik. Nilai gaya aktual tersebut relatif kecil dibandingkan kapasitas angkur yang digunakan sebagai dasar perancangan.

Tabel 5. Ringkasan respons struktural dan mekanis prototipe

Parameter/komponen	Nilai hasil analisis	Batas/acuan rancangan	Evaluasi
Lendutan rangka akibat beban 20 kg	0,54 mm	5 mm	Memenuhi
Gaya angin lateral pada 18 m/s	283,44 N	–	Beban rancangan
Tegangan lentur sambungan knockdown	138,48 MPa	(F _y =240) MPa	Memenuhi
Faktor keamanan sambungan knockdown	1,7	>1	Memenuhi
Gaya geser per baut angkur M12	35,43 N	Kapasitas jauh lebih besar	Memenuhi
Gaya tarik per baut angkur M12	82,67 N	>8.000 N*	Memenuhi berdasarkan asumsi rancangan
Tegangan geser kelompok baut rotor	1,88 MPa	57,6 MPa	Memenuhi
Faktor keamanan kelompok baut rotor	30,6	>1	Memenuhi
Tegangan puntir poros Sch 40	4,12 MPa**	144 MPa	Memenuhi berdasarkan perhitungan sumber
Faktor keamanan poros	34,85**	>1	Memenuhi berdasarkan perhitungan sumber
Tegangan lentur tubing 3/8 inci	432 MPa	Perlu konfirmasi spesifikasi material	Perlu verifikasi

Respons Mekanis Sistem Rotor dan Sambungan

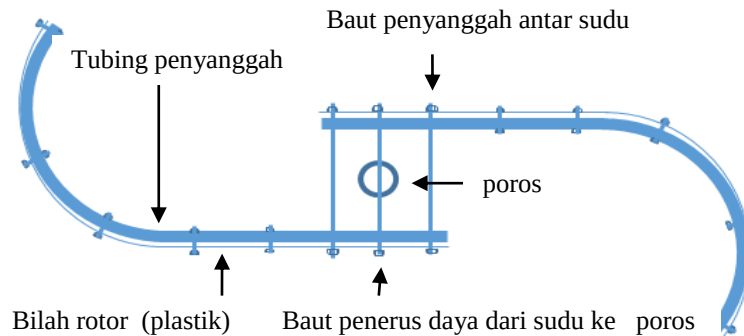
Sistem rotor menggunakan poros utama pipa baja Schedule 40 berdiameter luar 26,7 mm dengan ketebalan dinding 2,87 mm. Lengan penyangga sudu menggunakan tubing 3/8 inci, sedangkan sudu dibuat dari material polimer dengan ketebalan 1,5 mm. Sambungan antara poros, tubing, dan bilah diperkuat menggunakan satu baut utama dan dua baut tambahan M4 sehingga membentuk konfigurasi kelompok baut.

Pada kondisi pembebanan kritis yang digunakan dalam analisis, sebesar 50% gaya lateral total diasumsikan bekerja dominan pada satu sudu sehingga menghasilkan gaya sebesar 141,72 N. Berdasarkan luas total bidang geser kelompok baut sebesar 75,42 mm², tegangan geser aktual diperoleh sebesar 1,88 MPa. Nilai ini jauh lebih rendah daripada tegangan geser izin sebesar 57,6 MPa yang digunakan dalam perhitungan, sehingga menghasilkan faktor keamanan sebesar 30,6.

Poros utama memiliki momen inersia polar sekitar 30.938 mm⁴. Berdasarkan torsi rancangan yang digunakan dalam dokumen penelitian, tegangan puntir maksimum poros diperoleh sebesar 4,12 MPa. Nilai

tersebut masih berada di bawah batas tegangan geser material sebesar 144 MPa. Sebaliknya, lengan tubing 3/8 inci menghasilkan tegangan lentur sebesar 432 MPa, sehingga komponen ini merupakan bagian yang memberikan respons tegangan terbesar dibandingkan elemen mekanis lainnya.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa lokasi kritis struktur tidak berada pada kelompok baut atau poros utama, melainkan pada lengan tubing yang menopang bilah. Oleh karena itu, hasil pengujian kekuatan menunjukkan adanya kebutuhan untuk memberikan perhatian khusus pada karakteristik material dan dimensi tubing dalam evaluasi akhir sistem.



Gambar 2. Konfigurasi sambungan poros utama, tubing penyangga, dan bilah rotor

Karakteristik Cut-In dan Self-Starting Turbin

Pengujian lapangan menunjukkan bahwa rotor mampu mulai berputar tanpa beban pada kecepatan angin antara 1,1 dan 1,5 m/s. Setelah generator dihubungkan dengan beban listrik, kecepatan angin yang diperlukan untuk memulai putaran meningkat menjadi sekitar 2,1–2,5 m/s. Dengan demikian, pemasangan beban menyebabkan kenaikan ambang *cut-in wind speed* sekitar 1 m/s dibandingkan kondisi tanpa beban.

Tabel 6. Karakteristik cut-in wind speed prototipe

Kondisi operasi	Cut-in wind speed
Tanpa beban (no-load)	1,1–1,5 m/s
Dengan beban (with-load)	2,1–2,5 m/s
Perubahan ambang cut-in	$\pm 1,0$ m/s

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa rotor memiliki kemampuan *self-starting* pada kondisi angin rendah ketika tidak dibebani. Pada sistem dengan beban, rotor memerlukan energi aerodinamis yang lebih besar sebelum mampu mengatasi resistansi sistem mekanis dan generator. Perbedaan antara *no-load cut-in* dan *with-load cut-in* menjadi salah satu karakteristik penting performa prototipe pada pengujian lapangan.

Tidak ada sudah ditulis

Gambar 3. Perbandingan cut-in wind speed pada kondisi tanpa beban dan dengan beban

Performa Turbin pada Kondisi Angin Rooftop

Sebanyak 31 titik data diperoleh pada pengujian turbin di lingkungan rooftop. Kecepatan angin selama pengambilan data berada pada rentang 2,1–4,9 m/s. Dalam rentang tersebut, putaran generator bervariasi antara 93 dan 310 rpm, tegangan keluaran antara 1,2 dan 4,6 V, serta arus keluaran antara 0,16 dan 0,60 A. Rata-rata keseluruhan kecepatan angin selama pengamatan sebesar 3,62 m/s dengan putaran generator rata-rata sekitar 195,26 rpm, tegangan 2,71 V, dan arus 0,40 A.

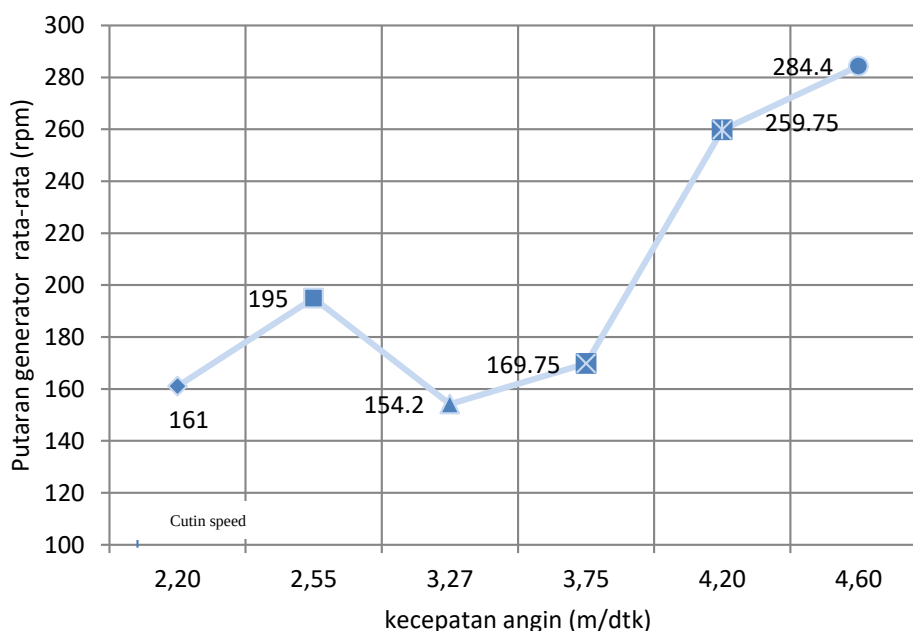
Untuk menunjukkan kecenderungan performa secara lebih jelas, data pengamatan dikelompokkan menjadi enam rentang kecepatan angin. Rekapitulasi hasil pengukuran disajikan pada Tabel 7. Daya listrik pada tabel dihitung dari hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan hubungan ($P_{out}=VI$).

Tabel 7. Distribusi dan performa rata-rata turbin berdasarkan rentang kecepatan angin

Rentang kecepatan angin (m/s)	N	Frekuensi (%)	RPM rata-rata	Tegangan rata-rata (V)	Arus rata-rata (A)	Daya listrik rata-rata (W)	TSR
2,1 – 2,4	2	6,45	161,00	1,60	0,24	0,42	0,957
2,5 – 2,9	2	6,45	195,00	2,15	0,30	0,69	1,000
3,0 – 3,4	10	32,26	154,20	1,87	0,36	0,74	0,617
3,5 – 3,9	8	25,81	169,75	2,53	0,39	0,90	0,622
4,0 – 4,4	4	12,90	259,75	3,95	0,50	1,97	0,809
4,5 – 4,9	5	16,13	284,40	4,34	0,58	2,52	0,809

Data menunjukkan bahwa respons turbin pada kecepatan angin rendah hingga menengah masih memperlihatkan variasi putaran yang cukup besar. Pada rentang 3,0–3,4 m/s, misalnya, putaran rata-rata sebesar 152,20 rpm, sedangkan pada rentang 2,5–2,9 m/s diperoleh nilai rata-rata 195 rpm. Kondisi ini menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan angin sesaat dan putaran rotor selama pengujian rooftop tidak sepenuhnya linier pada kecepatan rendah.

Kecenderungan yang lebih konsisten mulai terlihat pada kecepatan angin di atas 3,5 m/s. Pada rentang 3,5–3,9 m/s, turbin menghasilkan rata-rata 169,75 rpm dengan tegangan 2,53 V dan arus 0,41 A. Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 4,0–4,4 m/s, putaran rata-rata meningkat menjadi 259,75 rpm, disertai tegangan rata-rata sebesar 3,95 V dan arus 0,50 A. Pada rentang tertinggi 4,5–4,9 m/s, putaran rata-rata mencapai 284,40 rpm dengan tegangan 4,34 V dan arus 0,58 A.

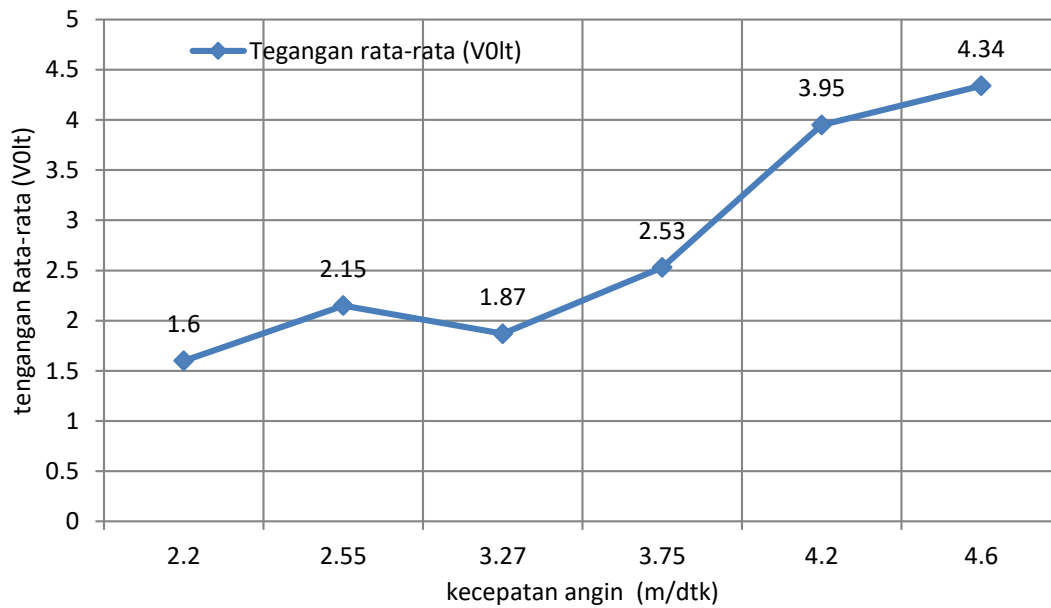


Gambar 4. Hubungan kecepatan angin dengan putaran generator selama pengujian rooftop

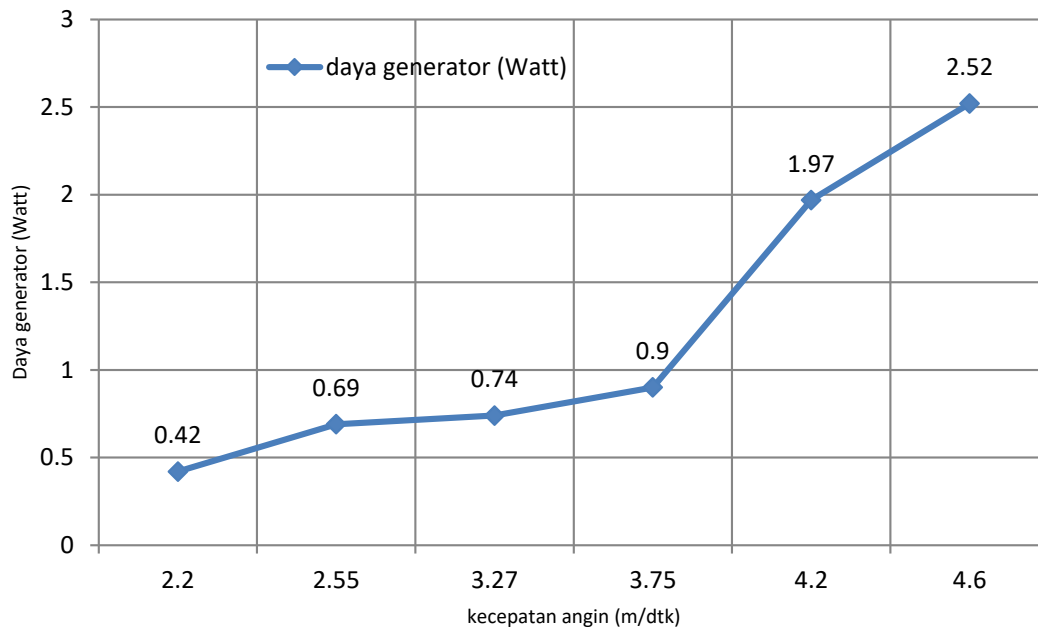
Karakteristik Keluaran Elektrik

Keluaran listrik prototipe menunjukkan peningkatan yang lebih jelas pada kondisi kecepatan angin di atas sekitar 3,5 m/s. Berdasarkan perhitungan dari tegangan dan arus terukur, daya listrik rata-rata meningkat dari sekitar 0,35 W pada rentang angin 2,1–2,4 m/s menjadi 1,12 W pada 3,5–3,9 m/s, 1,97 W pada 4,0–4,4 m/s, dan 2,52 W pada 4,5–4,9 m/s.

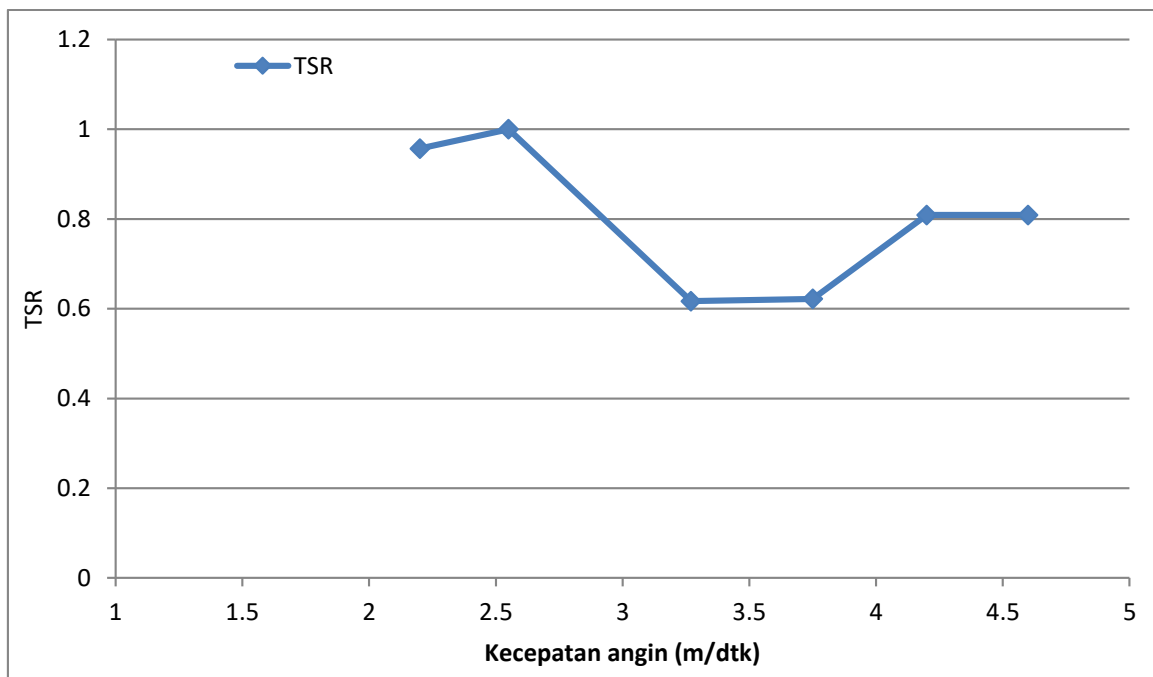
Nilai sesaat tertinggi selama pengujian diperoleh pada kecepatan angin 4,9 m/s, ketika generator mencapai 310 rpm dengan tegangan keluaran 4,6 V dan arus 0,59 A. Kombinasi parameter tersebut menghasilkan daya elektrik sesaat sekitar 2,71 W. Nilai RPM tertinggi juga terjadi pada kondisi pengukuran ini.



Gambar 5. Hubungan kecepatan angin dengan tegangan keluaran generator



Gambar 6. Hubungan kecepatan angin dengan daya listrik keluaran generator



Gambar 7. Hubungan kecepatan angin dengan TSR

Secara keseluruhan, data eksperimental memperlihatkan tiga karakteristik utama prototipe. Pertama, rotor mampu melakukan *self-starting* pada kecepatan angin relatif rendah, dengan *cut-in wind speed* tanpa beban sebesar 1,1–1,5 m/s dan dengan beban sebesar 2,1–2,5 m/s. Kedua, peningkatan kecepatan angin terutama di atas 3,5 m/s diikuti oleh kenaikan putaran generator dan keluaran elektrik. Ketiga, hasil evaluasi struktural menunjukkan bahwa sebagian besar elemen utama memiliki tegangan kerja di bawah kapasitas material yang digunakan dalam rancangan, sementara lengan tubing 3/8 inci merupakan komponen yang memerlukan verifikasi lebih lanjut karena menghasilkan tegangan lentur paling tinggi.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik utama prototipe VAWT Savonius Helical–Bach modifikasi tidak hanya ditentukan oleh respons aerodinamis rotor, tetapi merupakan hasil interaksi antara geometri rotor, kondisi aliran angin rooftop, sistem transmisi–generator, dan integritas struktur pendukung. Tiga temuan utama dapat diidentifikasi. Pertama, rotor mampu melakukan *self-starting* pada kecepatan angin 1,1–1,5 m/s tanpa beban dan 2,1–2,5 m/s ketika generator dibebani. Kedua, peningkatan performa elektrik menjadi lebih konsisten ketika kecepatan angin melampaui sekitar 3,5 m/s, dengan nilai sesaat tertinggi sebesar 310 rpm, 4,6 V, 0,59 A, dan 2,71 W pada kecepatan angin 4,9 m/s. Ketiga, analisis struktur memperlihatkan bahwa sebagian besar elemen utama memiliki margin terhadap kapasitas material yang digunakan dalam perancangan, sedangkan lengan tubing 3/8 inci merupakan bagian yang menerima tegangan paling kritis. Temuan tersebut menegaskan bahwa evaluasi VAWT skala kecil pada lingkungan urban sebaiknya tidak hanya berorientasi pada rotor, tetapi memandang turbin sebagai suatu sistem konversi energi yang terintegrasi. Hal tersebut sejalan dengan studi lapangan VAWT skala kecil yang menunjukkan bahwa karakteristik angin lokal, sistem mekanis, produksi energi, dan respons struktur saling berkaitan dalam menentukan performa aktual turbin [14], [15].

Karakteristik Self-Starting dan Cut-In Wind Speed

Kemampuan *self-starting* merupakan parameter penting bagi Savonius yang dirancang untuk daerah berkecepatan angin rendah, karena energi yang tersedia pada fase awal rotasi harus cukup untuk menghasilkan torsi aerodinamis yang melampaui resistansi mekanis sistem. Savonius secara umum memiliki karakteristik torsi awal yang lebih baik dibandingkan sejumlah konfigurasi VAWT berbasis gaya angkat karena perbedaan gaya drag antara sisi cekung dan cembung bilah menghasilkan momen putar bahkan ketika rotor belum mencapai kecepatan operasi optimal [4]. Namun, nilai kecepatan awal sangat dipengaruhi oleh konfigurasi rotor, posisi azimuth, *twist angle*, serta resistansi drivetrain. Penelitian Farozan et al. [13], misalnya, menunjukkan bahwa rotor Savonius dengan *twist angle* 90° mampu mencapai nilai rata-rata *self-starting wind speed* sekitar 2,5 m/s dan bahwa peningkatan *twist* dapat menurunkan sekaligus meratakan variasi kecepatan awal terhadap posisi azimuth. Nilai *loaded cut-in* 2,1–2,5 m/s pada penelitian ini karena itu berada pada rentang yang secara teknis sangat relevan untuk aplikasi Savonius pada lingkungan berkecepatan angin rendah, walaupun perbandingan

langsung harus dilakukan secara hati-hati karena perbedaan skala, generator, geometri, dan kondisi aliran antarpelelitian.

Peningkatan *cut-in wind speed* sekitar 1 m/s ketika generator diberi beban merupakan indikasi penting adanya resistansi tambahan pada rantai konversi energi. Pada keadaan tanpa beban, torsi aerodinamis terutama harus mengatasi inersia rotor, gesekan bantalan, dan resistansi mekanis transmisi. Ketika generator dihubungkan dengan beban, rotor juga harus menyediakan torsi yang cukup untuk mengatasi resistansi elektromagnetik generator. Vaz et al. [18] menunjukkan bahwa pada turbin angin kecil, resistansi drivetrain—termasuk gesekan bantalan dan *generator cogging torque*—dapat memainkan peran dominan selama proses awal karena torsi aerodinamis saat itu masih sangat kecil. *Cogging torque* pada mesin magnet permanen juga diketahui menjadi semakin penting pada aplikasi berdaya rendah dan berkecepatan rendah serta dapat meningkatkan kebutuhan torsi awal dan menyebabkan osilasi torsi [19]. Dengan demikian, perbedaan antara *no-load cut-in* dan *loaded cut-in* pada penelitian ini tidak seharusnya dipandang sebagai penurunan kemampuan aerodinamis rotor, melainkan sebagai respons sistem setelah rotor terkopel dengan subsistem konversi elektrik.

Peran Geometri Helical–Bach terhadap Karakteristik Rotor

Karakteristik *self-starting* tersebut secara aerodinamis kemungkinan berkaitan dengan konfigurasi rotor dua sudu Helical–Bach yang memiliki *aspect ratio* 1,50, *overlap ratio* 0,10, *arc angle* 135°, *twist angle* 90°, dan rasio geometris ($P/Q=1$). Namun, karena penelitian ini tidak membandingkan beberapa konfigurasi rotor secara eksperimental, kontribusi masing-masing parameter tersebut tidak dapat dipisahkan secara kausal. Literatur menunjukkan bahwa performa Savonius sangat sensitif terhadap interaksi beberapa parameter sekaligus, termasuk jumlah bilah, overlap, aspek rasio, bentuk profil, serta konfigurasi helikal [5], [6]. Lee et al. [7] juga menunjukkan bahwa perubahan *twist angle* menghasilkan perubahan nyata pada karakteristik koefisien daya dan torsi sepanjang posisi azimuth. Oleh sebab itu, hasil *self-starting* yang diperoleh lebih tepat diinterpretasikan sebagai karakteristik dari kombinasi geometri yang diuji, bukan efek individual dari satu parameter tertentu.

Relevansi penggunaan geometri Helical–Bach diperkuat oleh penelitian Damak et al. [8], yang secara eksperimental membandingkan rotor helikal dan Helical–Bach serta menemukan bahwa konfigurasi Helical–Bach mampu mencapai koefisien daya sekitar 0,20 pada TSR 0,75 sekaligus memiliki karakteristik torsi statik yang baik. Kombinasi profil Bach dengan geometri helikal secara konseptual menggabungkan kemampuan profil Bach dalam memperbaiki distribusi tekanan dan ekstraksi energi dengan keuntungan geometri helikal dalam meratakan karakteristik torsi sepanjang putaran. Studi numerik Niyat Zadeh et al. [9] juga menunjukkan bahwa modifikasi penampang Bach pada rotor helikal dapat mengurangi separasi aliran pada daerah tertentu dan meningkatkan performa dibandingkan model helikal dasar. Damak et al. [20] sebelumnya menunjukkan bahwa performa rotor helikal juga bergantung pada Reynolds number dan *overlap ratio*. Temuan-temuan tersebut menyediakan dasar fisik untuk menjelaskan rendahnya *cut-in* pada prototipe penelitian ini, tetapi tidak boleh digunakan untuk menyatakan bahwa *twist angle* 90° atau rasio ($P/Q=1$) secara individual merupakan konfigurasi optimum sebelum dilakukan pengujian komparatif. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data, dimensi rotor turbin angin Savonius dengan diameter 90 cm dan tinggi 135 cm terbukti bekerja secara efektif dan proporsional dalam menyerap energi kinetik angin. Melalui konversi rasio transmisi puli 18:5, diperoleh nilai Tip Speed Ratio (TSR) rotor aktual yang berkisar antara 0,6 hingga 1,01. Karakteristik capaian ini telah sesuai dan konsisten dengan teori performa aerodinamis kincir angin tipe drag-driven murni, di mana efisiensi mekanis puncak (Coefficient of Power (C_p) maks) dari turbin tipe Savonius murni secara ideal selalu berada pada rentang TSR 0,6 hingga 1,0 (26)

Respons Putaran pada Kondisi Angin Rooftop

Hubungan antara kecepatan angin dan putaran generator dalam penelitian ini tidak sepenuhnya monoton pada kecepatan rendah. Pada rentang 2,5–2,9 m/s diperoleh putaran rata-rata 195 rpm, sedangkan pada rentang yang lebih tinggi, yaitu 3,0–3,4 m/s, putaran rata-rata justru sebesar 152,20 rpm. Setelah kecepatan angin berada di atas sekitar 3,5 m/s, kecenderungannya menjadi lebih konsisten, dengan putaran rata-rata meningkat menjadi 169,75 rpm pada 3,5–3,9 m/s, 259,75 rpm pada 4,0–4,4 m/s, dan 284,40 rpm pada 4,5–4,9 m/s. Fenomena ini merupakan karakteristik penting pengujian lapangan dan tidak harus ditafsirkan sebagai anomali rotor. Angin pada lingkungan terbangun bersifat lebih turbulen, mengalami perubahan arah, *gust*, *shear*, dan interaksi dengan geometri bangunan sehingga kecepatan yang terukur secara sesaat tidak selalu berkorespondensi langsung dengan keadaan energi dan putaran rotor pada saat yang sama [1], [10], [21].

Selain sifat aliran yang tidak tunak, inersia rotor menyebabkan respons putaran mempunyai skala waktu tertentu sehingga perubahan kecepatan angin tidak langsung diikuti perubahan RPM dengan magnitudo yang sama. Danao et al. [11] menunjukkan secara eksperimental bahwa fluktuasi kecepatan angin menghasilkan fluktuasi kecepatan putar dan daya pada VAWT serta dapat menimbulkan efek histeresis pada kondisi tertentu. Lubitz [22] juga mendapatkan adanya *time lag* antara perubahan kecepatan angin dan respons daya pada turbin kecil, sedangkan Battisti et al. [12] menekankan pentingnya inersia rotor dalam menilai kemampuan turbin kecil mengikuti perubahan kondisi angin urban. Dengan demikian, penyebaran RPM yang dijumpai pada penelitian ini dapat dipahami sebagai kombinasi antara turbulensi rooftop, durasi *gust*, inersia rotor, dan pembebanan

generator. Kondisi ini sekaligus menunjukkan bahwa performa turbin rooftop sebaiknya tidak dinilai hanya dari pasangan kecepatan angin–RPM sesaat tanpa mempertimbangkan resolusi waktu pengukuran.

Hal tersebut memiliki implikasi metodologis yang penting. Tabrizi et al. [3] menunjukkan bahwa estimasi turbulensi rooftop sangat dipengaruhi oleh *sampling rate* dan periode perata-rataan, sedangkan Pagnini et al. [2] memperlihatkan bahwa kurva daya aktual turbin kecil pada lingkungan urban dapat berbeda secara substansial dari karakteristik ideal akibat variasi turbulensi. Oleh karena itu, ketidaklinieran RPM yang ditemukan dalam penelitian ini justru memperkuat pentingnya validasi lapangan terhadap desain VAWT yang sebelumnya banyak dievaluasi dalam wind tunnel dengan aliran relatif terkendali.

Keluaran Elektrik dan Efektivitas Rantai Konversi Energi

Kecenderungan keluaran elektrik menunjukkan respons yang lebih sistematis dibandingkan RPM pada rentang angin rendah. Daya rata-rata meningkat dari 0,35 W pada 2,1–2,4 m/s menjadi 0,55 W pada 2,5–2,9 m/s, 0,68 W pada 3,0–3,4 m/s, 1,12 W pada 3,5–3,9 m/s, 1,97 W pada 4,0–4,4 m/s, dan 2,52 W pada 4,5–4,9 m/s. Dengan demikian, daya rata-rata pada kelompok kecepatan tertinggi sekitar 7,2 kali daya pada kelompok kecepatan terendah. Kecenderungan tersebut secara fisik konsisten dengan prinsip dasar bahwa daya kinetik yang tersedia dalam aliran angin bergantung secara kubik terhadap kecepatan angin. Akan tetapi, daya angin yang tersedia tidak identik dengan daya listrik pada beban karena energi harus melewati tahapan konversi aerodinamis, mekanis, transmisi, generator, dan beban. Literatur Savonius menunjukkan bahwa parameter operasi dan geometri sangat memengaruhi fraksi energi angin yang dapat dikonversikan menjadi daya rotor [4], sedangkan pengujian lapangan turbin urban menunjukkan bahwa kondisi turbulensi dan karakteristik sistem aktual dapat membuat keluaran berbeda dari kondisi ideal [2].

Nilai daya listrik sesaat maksimum sekitar 2,71 W perlu dibaca dalam konteks bahwa generator yang digunakan memiliki rating nominal 350 W pada kondisi putaran nominal yang berbeda, sedangkan putaran maksimum terukur dalam penelitian ini hanya mencapai 310 rpm. Dengan demikian, rating 350 W tidak dapat digunakan sebagai pembanding langsung untuk menilai efisiensi sistem pada kondisi pengujian tersebut. Kinerja aktual generator magnet permanen bergantung pada kecepatan putar, karakteristik elektromagnetik, impedansi beban, rugi-rugi tembaga dan inti, serta kesesuaian titik operasi rotor dengan generator. Verde et al. [23] menunjukkan bahwa karakterisasi turbin kecil dengan generator magnet permanen harus mempertimbangkan rugi-rugi pada rotor, generator, dan rangkaian elektrik secara bersama-sama. Vaz et al. [18] juga menunjukkan pentingnya resistansi drivetrain terutama pada fase start dan operasi kecepatan rendah, sementara Öztürk et al. [19] memperlihatkan bahwa *cogging torque* merupakan aspek penting pada generator magnet permanen untuk turbin berdaya rendah. Oleh sebab itu, keluaran beberapa watt pada prototipe ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai keluaran sistem pada rentang angin 2,1–4,9 m/s dan konfigurasi beban yang digunakan, bukan sebagai ukuran utilisasi terhadap rating nominal 350 W.

Rasio pulley 18:5 atau 3,6 yang digunakan bertujuan meningkatkan kecepatan putar generator relatif terhadap rotor, tetapi mekanisme peningkatan putaran juga membawa konsekuensi berupa kebutuhan torsi pada sisi rotor serta tambahan kerugian mekanis pada transmisi. Hal ini menjelaskan mengapa optimasi VAWT skala kecil tidak cukup dilakukan hanya dengan meningkatkan (C_p) rotor; *matching* antara karakteristik torsi–kecepatan rotor, rasio transmisi, generator, dan beban elektrik juga harus diperhatikan. Studi rooftop terbaru oleh Toor et al. [15] menegaskan pentingnya menghubungkan optimasi aerodinamis dengan validasi keluaran lapangan karena kondisi rooftop dapat menghasilkan *starting speed* dan keluaran yang berbeda dari pengujian laboratorium. Dengan demikian, tahap pengembangan berikutnya dari prototipe ini idealnya diarahkan pada optimasi *rotor–generator matching*, bukan sekadar peningkatan ukuran atau kapasitas nominal generator.

Kinerja Struktur dan Integritas Mekanis

Analisis struktur menunjukkan bahwa lendutan rangka akibat beban statis 20 kg sebesar 0,54 mm masih jauh di bawah batas rancangan 5 mm. Tegangan lentur sambungan *knockdown* sebesar 138,48 MPa juga berada di bawah kuat leleh 240 MPa yang digunakan sebagai acuan, dengan faktor keamanan sekitar 1,7. Demikian pula, tegangan geser kelompok baut rotor sebesar 1,88 MPa dan gaya pada baut angkur relatif rendah terhadap kapasitas yang digunakan dalam perancangan. Hasil ini penting karena kestabilan struktur merupakan bagian intrinsik dari performa sistem VAWT. Pagnini et al. [14] menunjukkan melalui studi skala penuh bahwa karakterisasi performa energi dan perilaku struktur VAWT saling berhubungan dan sama-sama dipengaruhi oleh kondisi angin lokal. Struktur yang terlalu fleksibel atau memiliki karakteristik dinamis yang tidak sesuai dapat meningkatkan risiko getaran, misalignment, resonansi, dan beban siklik yang pada akhirnya memengaruhi umur lelah dan kestabilan sistem.

Kebutuhan evaluasi struktur menjadi lebih penting untuk instalasi rooftop karena turbulensi lingkungan terbangun menghasilkan beban yang tidak selalu dapat direpresentasikan dengan kondisi aliran stasioner. Bashirzadeh Tabrizi et al. [24] menemukan bahwa pada kondisi turbulensi tinggi, kejadian beban terisolasi pada turbin kecil dapat jauh lebih besar daripada estimasi yang diperoleh dari spektrum angin standar. Orlando et al. [25] juga menunjukkan bahwa kondisi non-stasioner seperti perubahan angin, start, dan stop dapat berperan signifikan terhadap respons struktur dan kerusakan lelah VAWT. Oleh karena itu, faktor keamanan statis pada

penelitian ini merupakan informasi awal yang penting, tetapi belum sepenuhnya menggambarkan reliabilitas struktur untuk operasi rooftop jangka panjang. Evaluasi berikutnya sebaiknya mencakup respons dinamis, frekuensi alami, amplitudo vibrasi, dan kelelahan sambungan selama siklus operasi.

Temuan yang memerlukan perhatian khusus adalah tegangan lentur sebesar 432 MPa pada lengan tubing 3/8 inci, yang merupakan respons tegangan terbesar di antara elemen mekanis yang dianalisis. Karena spesifikasi kuat leleh tubing pada draft masih perlu diverifikasi, status akhir kelayakan komponen ini belum dapat ditetapkan secara definitif. Namun, dari perspektif desain, temuan ini memperlihatkan adanya *trade-off* yang penting: peningkatan gaya aerodinamis yang menghasilkan torsi rotor pada saat yang sama meningkatkan momen lentur pada lengan sudu. Dengan hubungan dasar ($M=FL$), penggunaan lengan yang relatif panjang dan berdiameter kecil dapat menyebabkan konsentrasi tegangan di bagian sambungan terhadap poros. Kajian struktural VAWT menunjukkan bahwa kondisi non-stasioner dan pembebanan siklik dapat memperbesar signifikansi detail struktur yang pada analisis statis terlihat sederhana [14], [25]. Oleh sebab itu, tubing 3/8 inci sebaiknya diperlakukan sebagai **komponen kritis desain**, baik melalui verifikasi sifat material aktual, peningkatan modulus penampang, pengurangan panjang kantilever efektif, maupun penambahan elemen pengaku.

Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa prototipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) Savonius Helical–Bach modifikasi dengan rasio kelengkungan seimbang ($p=q$) mampu beroperasi pada kondisi angin rendah di lingkungan rooftop. Rotor memiliki *cut-in wind speed* sebesar 1,1–1,5 m/s pada kondisi tanpa beban dan meningkat menjadi 2,1–2,5 m/s ketika generator dibebani, yang menunjukkan pengaruh resistansi mekanis dan elektromagnetik terhadap kebutuhan torsi awal sistem. Pada rentang kecepatan angin pengujian 2,1–4,9 m/s, peningkatan kecepatan angin secara umum diikuti oleh peningkatan putaran dan keluaran elektrik, terutama pada kecepatan di atas 3,5 m/s. Kondisi performa sesaat tertinggi diperoleh pada kecepatan angin 4,9 m/s dengan putaran generator 310 rpm, tegangan 4,6 V, arus 0,59 A, dan daya listrik sekitar 2,71 W. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi Helical–Bach yang diuji memiliki karakteristik *self-starting* dan TSR yang mendukung pemanfaatan energi angin berkecepatan rendah, meskipun performa aktualnya tetap dipengaruhi oleh fluktuasi dan turbulensi aliran pada lingkungan rooftop.

Dari aspek mekanis, sebagian besar elemen struktur penyangga dan sambungan menunjukkan tegangan kerja yang masih berada dalam batas kapasitas rancangan yang digunakan, dengan lendutan rangka sebesar 0,54 mm, tegangan lentur sambungan *knockdown* sebesar 138,48 MPa, serta faktor keamanan sekitar 1,7. Namun, lengan tubing 3/8 inci menghasilkan respons tegangan lentur tertinggi dan teridentifikasi sebagai komponen kritis yang memerlukan verifikasi sifat material dan penguatan desain. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan pentingnya mengevaluasi turbin Savonius Helical–Bach sebagai sistem terintegrasi yang mencakup rotor, transmisi, generator, dan struktur, bukan hanya berdasarkan karakteristik aerodinamis rotor. Temuan ini memberikan dasar eksperimental bagi pengembangan VAWT skala kecil untuk aplikasi rooftop, sementara penelitian lanjutan perlu diarahkan pada pengukuran torsi, TSR, (C_p), vibrasi, ketidakpastian pengukuran, serta pengujian komparatif dengan konfigurasi rotor referensi.

Daftar Pustaka

- [1] A. KC, J. Whale, and T. Urmee, "Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review," *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 268–283, 2019.
- [2] L. C. Pagnini, M. Burlando, and M. P. Repetto, "Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 112–121, 2015.
- [3] A. B. Tabrizi, J. Whale, T. Lyons, and T. Urmee, "Rooftop wind monitoring campaigns for small wind turbine applications: Effect of sampling rate and averaging period," *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 320–330, 2015.
- [4] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, and A. P. Petry, "A review on the performance of Savonius wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3054–3064, 2012.
- [5] U. K. Saha, S. Thotla, and D. Maity, "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 8–9, pp. 1359–1375, 2008.
- [6] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, and S. V. Prabhu, "Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor," *Applied Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1064–1073, 2009.
- [7] J.-H. Lee, Y.-T. Lee, and H.-C. Lim, "Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 231–244, 2016.
- [8] A. Damak, Z. Driss, and M. S. Abid, "Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, pp. 80–93, 2018.
- [9] M. Niyat Zadeh, M. Pourfallah, S. Safari Sabet, M. Gholinia, S. Mouloudi, and A. Taheri Ahangar, "Performance assessment and optimization of a helical Savonius wind turbine by modifying the Bach's section," *SN Applied Sciences*, vol. 3, p. 739, 2021.
- [10] R. Longo, P. Nicastro, M. Natalini, P. Schito, R. Mereu, and A. Parente, "Impact of urban environment on Savonius wind turbine performance: A numerical perspective," *Renewable Energy*, vol. 156, pp. 407–422, 2020.

- [11] L. A. Danao, O. Eboibi, and R. Howell, "An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine," *Applied Energy*, vol. 107, pp. 403–411, 2013.
- [12] L. Battisti, E. Benini, A. Brighenti, S. Dell'Anna, and M. Raciti Castelli, "Small wind turbine effectiveness in the urban environment," *Renewable Energy*, vol. 129, pp. 102–113, 2018.
- [13] I. Farozan, T. A. F. Soelaiman, P. Soetikno, and Y. S. Indartono, "The effect of rotor aspect ratio, stages, and twist angle on Savonius wind turbine performance in low wind speeds environment," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 104041, 2025.
- [14] L. Pagnini, G. Piccardo, and M. P. Repetto, "Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 41–55, 2018.
- [15] Z. Toor, H. M. Bahaidarah, M. E. Zayed, S. Rehman, V. Khanna, and S. M. Shalaby, "Experimental investigation and CFD modeling on rooftop vertical axis wind turbine for sustainable residential buildings: Development of core design optimization and advanced performance analysis," *Energy and Buildings*, vol. 353, p. 116901, 2026.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, SNI 1729:2020, Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural (ANSI/AISC 360-16, IDT). Jakarta: BSN, 2020.
- [17] American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, IL: AISC, 2016.
- [18] J. R. P. Vaz, D. H. Wood, D. Bhattacharjee, and E. F. Lins, "Drivetrain resistance and starting performance of a small wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 117, pp. 509–519, 2018.
- [19] N. Öztürk, A. Dalcı, E. Çelik, and S. Sakar, "Cogging torque reduction by optimal design of PM synchronous generator for wind turbines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17593–17600, 2017.
- [20] A. Damak, Z. Driss, and M. S. Abid, "Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180°," *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 136–142, 2013.
- [21] F. C. Emejeamara, A. S. Tomlin, and J. T. Millward-Hopkins, "Urban wind: Characterisation of useful gust and energy capture," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 162–172, 2015.
- [22] W. D. Lubitz, "Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 61, pp. 69–73, 2014.
- [23] A. Verde, O. Lastres, G. Hernández, G. Ibañez, L. Vereá, and P. J. Sebastian, "A new method for characterization of small capacity wind turbines with permanent magnet synchronous generator: An experimental study," *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00732, 2018.
- [24] A. Bashirzadeh Tabrizi, J. Whale, T. Lyons, T. Urmeé, and J. Peinke, "Modelling the structural loading of a small wind turbine at a highly turbulent site via modifications to the Kaimal turbulence spectra," *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 288–300, 2017.
- [25] A. Orlando, L. Pagnini, and M. P. Repetto, "Structural response and fatigue assessment of a small vertical axis wind turbine under stationary and non-stationary excitation," *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 251–266, 2021.
- [26] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons . (2010)